

УДК 621.374.

doi: 10.20998/2218-1849.2020.01.06

Федюшко Александр Юрьевич, канд. тех. наук*Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства им. П.Василенко, ул. Алчевских, 44, г. Харьков, Украина, 61002*

Тел.+38 (050) 4 02 62 12; E-mail: tte_nniekt @ ukr.net

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГЕНЕРАТОРА С СИСТЕМОЙ ФАЗОВОЙ ПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Обеспечение населения плодовой продукцией определяется не только уровнем производства, но и эффективной организацией хранения. Практический опыт показывает, что для хранения плодово-ягодной продукции широкое распространение получил метод хранения плодов в холодильных камерах с регулируемой газовой средой. Существенным недостатком газовой среды является то, что значительная доля потерь плодов (до 30 %) в период хранения, приходится на поражение их физиологическими расстройствами и болезнями (плесень, грибки, споровые бактерии. В связи с чем возникает необходимость в разработке новых, более доступных и менее затратных технологий хранения на основе применения электромагнитных излучений. В статье исследованы флуктуационные процессы в системе ФАПЧ генератора с определением её основных параметров. Теоретический анализ показал, что для уничтожения микроорганизмов на поверхности яблок следует проводить с использованием электромагнитного излучения в диапазоне частот 73–77 ГГц, экспозицией 60–80 с., мощностью 650–750 МВт и относительной нестабильностью частоты 10^{-7} – 10^{-8} . Анализ полученных данных показал, что однокольцевая схема ФАПЧ не может быть использована для создания стабильного по частоте генератора перестраиваемого в диапазоне частот миллиметрового диапазона с коэффициентом умножения 1500 единиц. Для анализа флуктуационных характеристик выходного сигнала генератора предложено математическое описание процесса синхронизации частоты синхронизируемого генератора для однокольцевой системы ФАПЧ.

Ключевые слова: электромагнитное излучение; крайневыхочастотный диапазон; дисперсия фазы колебаний; параметры системы ФАПЧ.

Федюшко Олександр Юрійович, канд. тех. наук*Харківський національний технічний університет сільського господарства ім. П.Василенко, вул. Алчевських, 44, г. Харків, Україна, 61002*

Тел. + 38 (050) 4 02 62 12; E-mail: tte_nniekt @ ukr.net

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГЕНЕРАТОРА З СИСТЕМОЮ ФАЗОВОГО ПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Забезпечення населення плодовою продукцією визначається не тільки рівнем виробництва, а й ефективною організацією зберігання. Практичний досвід показує, що для зберігання плодово-ягідної продукції широкого поширення набув метод зберігання плодів в холодильних камерах з регульованим газовим середовищем. Істотним недоліком газового середовища є те, що значна частка втрат плодів (до 30%) в період зберігання, доводиться на поразку їх фізіологічними розладами і хворобами (цвіль, грибки, спорові бактерії). У зв'язку з цим виникає необхідність в розробці нових, більш доступних і менш витратних технологій зберігання на основі застосування електромагнітних випромінювань. У статті досліджено флуктуаційні процеси в системі ФАПЧ генератора з визначенням їх основних параметрів. Теоретичний аналіз показав, що для знищення мікроорганізмів на поверхні яблук слід проводити заходи з використанням електромагнітного випромінювання в діапазоні частот 73-77 ГГц, експозицією 60-80 с., потужністю 650-750 МВт і відносною нестабільністю частоти 10^{-7} - 10^{-8} . Аналіз отриманих даних показав, що однокільцева схема ФАПЧ не може бути використана для створення стабільного за частотою генератора та перебудовується в діапазоні частот міліметрового діапазону з коефіцієнтом множення 1500 одиниць. Для аналізу флуктуаційних характеристик вихідного сигналу генератора запропоновано математичний опис процесу синхронізації частоти, який потрібно синхронізувати з генератором для однокільцевої системи ФАПЧ.

Ключові слова: електромагнітне випромінювання; вкрай височастотний діапазон; дисперсія фази коливань; параметри системи ФАПЧ.

Fedyushko Alexander Yuryevich, candidate of technical sciences*Kharkov National Technical University agriculture them. P. Vasilenko, str. Alchevskikh, 44, Kharkiv, Ukraine, 61002*

Tel. + 38 (050) 4 02 62 12; E-mail: tte_nniekt @ ukr.net

THEORETICAL RESEARCH OF THE PARAMETERS OF THE GENERATOR WITH THE SYSTEM PHASE FREQUENCY ADJUSTMENT

Providing the population with fruit products is determined not only by the level of production, but also by the effective organization of storage. Practical experience shows that for storing fruit and berry products, the method of storing fruits in cold rooms with a controlled gas environment has become widespread. A significant drawback of the gas environment is that a significant proportion of fruit loss (up to 30%) during storage is due to their defeat by physiological disorders and diseases (mold, fungi, spore-forming bacteria). Therefore, there is a need to develop new, more affordable and less costly storage technologies based on the use of electromagnetic radiation. The article studies the fluctuation processes in the PLL system of the generator with the definition of its main parameters. It is shown that for the destruction of microorganisms on the surface of apples, it should be carried out using electromagnetic radiation in the frequency range 73–77 GHz, exposure time 60–80 s, power 650–750 MW and relative frequency instability 10⁻⁷–10⁻⁸. The data showed that a single-ring PLL cannot be used to create a frequency-stable oscillator tunable in the frequency range of the millimeter range with a multiplication factor of 1500 units. To analyze the fluctuation characteristics of the generator output signal, a mathematical description of the frequency synchronization process of the synchronized generator for a single-loop PLL system is proposed.

Keywords: *grain of mulberry silkworm; electromagnetic radiation; range of high-purity; dispersion of phase vibrations; parameters of the system phase tuning frequency.*

Введение

Обеспечение населения плодовой продукцией определяется не только уровнем производства, но и эффективной организацией хранения.

Практический опыт показывает, что для хранения плодово-ягодной продукции широкое распространение получил метод хранения плодов в холодильных камерах с регулируемой газовой средой (РГС) [1]. Существенным недостатком газовой среды является то, что значительная доля потерь плодов (до 30 %) в период хранения, приходится на поражение их физиологическими расстройствами и болезнями (плесень, грибки, споровые бактерии и др.) [1, 2]. В связи с чем возникает необходимость в разработке новых, более доступных и менее затратных технологий хранения на основе применения электромагнитных излучений [3]. Применение таких технологий требует проведения как теоретических исследований по определению биотропных параметров ЭМП, так и создания высокостабильных по частоте генераторов в коротковолновой области миллиметрового диапазона для облучения яблок в процессе их длительного хранения [2].

Из литературных источников следует, что создание высокостабильных по частоте источников ЭМ излучения в коротковолновой части миллиметрового диапазона является довольно сложной научно-технической задачей [3].

В настоящее время существующие полупроводниковые приборы позволяют создавать высокостабильные, перестраиваемые по частоте генераторы миллиметрового диапазона, у которых СВЧ часть построена на основе фазовой перестройки частоты (ФАПЧ).

Цель и задачи исследования

Целью настоящей статьи являются исследования флуктуационных процессов в системе ФАПЧ генератора с определением её основных параметров.

Основная часть

Теоретический анализ показал, что для уничтожения микроорганизмов на поверхности яблок следует проводить с использованием электромагнитного излучения в диапазоне частот 73–77 ГГц, экспозицией 60–80 с., мощностью 650–750 МВт и относительной нестабильностью частоты 10⁻⁷–10⁻⁸.

Анализ серийно выпускаемой аппаратуры в миллиметровом диапазоне длин волн показал, что эта аппаратура не удовлетворяет требованиям для уничтожения микроорганизмов на поверхности яблок [4, 5].

Создание стабилизированного по частоте источника, перестраиваемого в диапазоне частот 73–77 ГГц, является трудной научно-технической задачей [6]. Как показал анализ, эту задачу можно решить на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) автогенератора по частоте кварцевого генератора.

Решение задачи, связанное с определением структурной схемы высокостабильного электромагнитного источника в диапазоне частот на основе ФАПЧ, сводится к определению элементов системы переноса спектра от кварцевого генератора в миллиметровый диапазон [7, 8].

Применение системы ФАПЧ позволит обеспечить требуемое отношение сигнал/шум на выходе генератора при минимальном значении дисперсии фазы выходного сигнала [8].

Функциональная схема с одним кольцом ФАПЧ показана на рис. 1 [7].

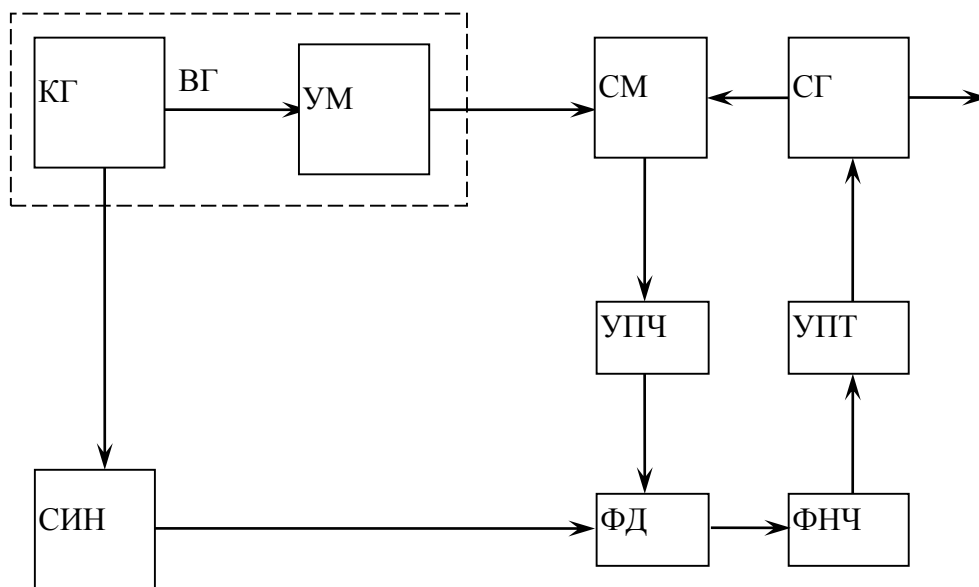


Рис. 1. Схема высокостабильного по частоте генератора с однокольцевой системой ФАПЧ

В схеме (рис. 1) напряжение синхронизируемого генератора (СГ) высокостабильного генератора (ВГ) преобразуются в смесителе (СМ) на промежуточную фазу. На фазовый детектор (ФД) поступает напряжение синтезатора (СИН) и напряжение промежуточной фазы сигнала. При наличии фазового рассогласования между этими напряжениями на выходе ФД появляется управляющее напряжение, которое через фильтр нижних частот (ФНЧ) и усилитель постоянного тока (УПТ) изменяет частоту стабилизируемого генератора. В результате работы системы автоподстройки фаза преобразованного смесителем сигнала поддерживается равной фазе синтезатора. Частота синхронизируемого генератора $\omega_{СГ}$ при этом равна разности частот кварцевого генератора с выхода умножителя (УМ) и синтезатора, то есть $\omega_{СГ} = N \omega_{КГ} - \omega_{СИН}$.

Выходным напряжением системы является напряжение синхронизируемого генератора. Перестройка его частоты осуществляется изменением частоты синтезатора. Величина последней выбирается значительно меньшей, чем частота высокостабильного генератора.

Поэтому относительная нестабильность частоты сформированных системой колебаний определяется в основном нестабильностью частоты кварцевого генератора и умножителя.

Для анализа флуктуационных характеристик выходного сигнала генератора найдем математическое описание процесса синхронизации частоты генератора в схеме, изображенной на рис. 1 [7,9]. В данной схеме на смеситель поступают напряжения от высокостабильного генератора (ВГ) и синхронизируемого генератора:

$$\begin{aligned} U_{ВГ}(t) &= U_{ВГ} \sin \varphi_{ВГ}(t); \\ U_{СГ}(t) &= U_{СГ} \sin \varphi_{СГ}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где:

$$\begin{aligned} \omega_{ВГ}(t) &= \varphi_{ОВГ} + \int_0^t \omega_{ВГ}(t) dt; \\ \varphi_{ОВГ} &\text{ – начальная фаза высокостабильного генератора;} \\ \omega_{ВГ}(t) &\text{ – частота высокостабильного генератора;} \\ \omega_{СГ}(t) &= \varphi_{ОСГ} + \int_0^t \omega_{СГ}(t) dt \quad \text{ – фаза синхронизируемого генератора.} \end{aligned}$$

На выходе смесителя формируется напряжение, зависящее от разности фаз, которая равна:

$$\varphi_{ПР}(t) = \varphi_{ВГ}(t) - \varphi_{СГ}(t) \quad (2)$$

Напряжение от усилителя промежуточной частоты и синтезатора подаются на вход фазового детектора (ФД), на выходе которого разность фаз $\varphi(t)$ равна:

$$\varphi(t) = \varphi_{ПР}(t) - \varphi_{СИН}(t). \quad (3)$$

Равенство (3) справедливо в том случае, если полоса пропускания УПЧ значительно превышает полосу пропускания ФНЧ [10].

Управляющее напряжение $U_{\phi}(t)$, снимаемое с фильтра низкой частоты (ФНЧ), связано с напряжением на выходе фазового детектора $U_{Д}(t)$ с помощью линейного дифференциального оператора $K_{\phi}(p)$:

$$U_{\phi}(t) = K_{\phi}(p) \cdot U_{Д}(t) \quad (4)$$

Структурная схема ФАПЧ, поведение которой описывается уравнениями (1)–(4), приведена на рис. 2.

В данной схеме блок 1/р отображает операцию интегрирования, соответствующую интегралу $\int_0^t \omega_{СГ}(t) dt$, а Sy является крутизной регулировочной характеристики синхронизируемого генератора; КУ(р), КУПТ, КСГ – коэффициенты передачи УПЧ, УПТ и СГ.

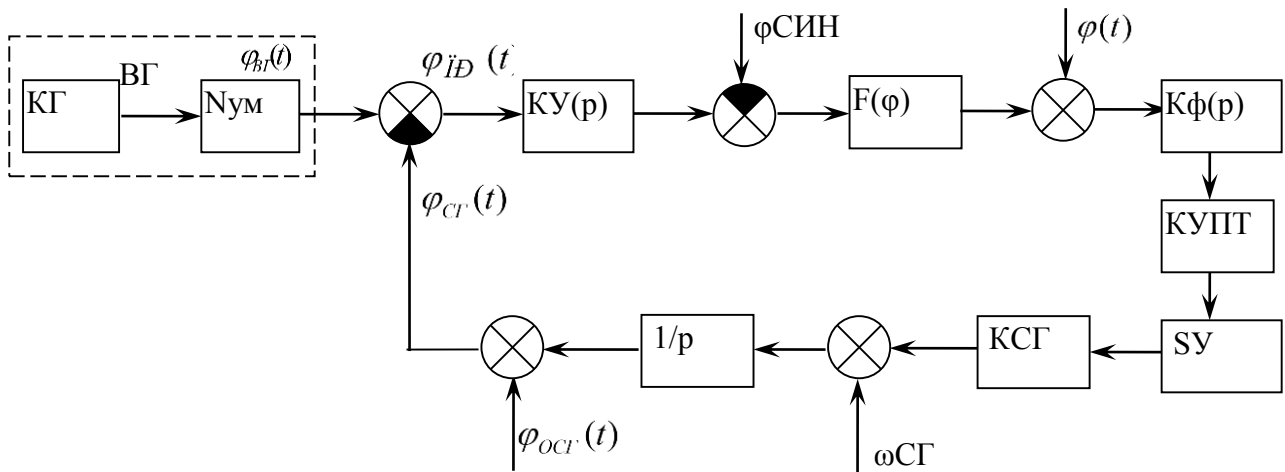


Рис. 2. Структурная однокольцевая схема ФАПЧ

Из рассмотрения структурной схемы (рис. 2) следует, что показатели системы преобразования частоты всецело определяются показателями ФАПЧ: полосами схватывания и удержания, устойчивостью, фильтрующей способностью, числом колец ФАПЧ.

На характеристики ФАПЧ оказывают большое влияние: коэффициент умножения частоты Нумн, запаздывание в трактах усилителя, умножителя и синтезатора частот, применение пропорционально-интегрирующего фильтра после фазового детектора. В реальных схемах указанные особенности обуславливают высокий порядок нелинейного дифференциального уравнения, точно описывающего поведение подобной системы, и сложность его исследования. Строгое исследование нелинейного дифференциального стохастического уравнения с переменными коэффициентами и случайными воздействиями представляют собой практически неразрешимую задачу [10, 11]. При малых случайных воздействиях, когда нелинейными свойствами ФАПЧ можно пренебречь, анализ может быть проведен с помощью метода линеаризации [8, 11].

Считая, что система ФАПЧ находится в состоянии синхронизма, запишем мгновенную разность фаз сигналов на входах фазового детектора следующим образом:

$$\varphi(t) = \bar{\varphi} + \Delta\varphi(t), \quad (5)$$

где:

- $\bar{\varphi}$ – среднее значение разности фаз;
- $\Delta\varphi(t)$ – отклонение мгновенной разности фаз от среднего значения под действием помех.

Разлагая нелинейную характеристику ФД в ряд Тейлора вокруг точки, соответствующей среднему значению фазы, и ограничиваясь линейными членами разложения, напряжение на выходе ФД можно представить следующим образом:

$$U_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФД max}} \cos \bar{\varphi} + U_{\text{ФД max}} |\sin \bar{\varphi}| \Delta\varphi(t) + U_{\text{ФД max}} \cos \bar{\varphi} [\varepsilon_{\text{ВГ}}(t) + \varepsilon_{\text{СГ}}(t)], \quad (6)$$

где:

- $U_{\text{ФД max}} = K_{\text{Д}} U_{\text{ВГ}} U_{\text{СГ}}$; $K_{\text{Д}}$ – коэффициент детектирования.

В выражении (6) первый член представляет собой постоянную составляющую, компенсирующую начальную расстройку генераторов по частоте, второй член – переменную составляющую, пропорциональную мгновенному отклонению разности фаз от ее стационарного значения, а третий член – паразитную амплитудную модуляцию выходного сигнала ФД, обусловленную вариациями амплитуд входных сигналов. Последняя составляющая приводит к паразитной фазовой модуляции СГ. Из выражения (6) следует, что при малых отклонениях фазы от среднего значения $\bar{\varphi}$ приращение напряжения на выходе ФД будет определяться следующим выражением [11]:

$$\Delta U_{\text{ФД}} = K_{\text{ФД}} \Delta \varphi, \quad (7)$$

где:

$K_{\text{ФД}} = -K_{\text{Д}} \sin \bar{\varphi}$ – коэффициент передачи ФД, в лучшем случае равный 1.

Если учесть инерционность выпрямителей, то передаточная функция ФД будет определяться выражением:

$$K_{\text{ФД}}(p) = \frac{K_{\text{ФД}}}{1 + pT_{\text{ФД}}}, \quad (8)$$

где:

- $T_{\text{ФД}} = 4C_{\text{н}}(R_{\text{н}} + R_{\text{i}})$ – постоянная времени ФД;
- R_{i} – внутреннее сопротивление диода.

Полагая, что все запаздывание сосредоточено в УПЧ, и линеаризуя характеристику фазового детектора вблизи точки равновесия, можно процессы в системе с ФАПЧ описать с помощью линейного операторного уравнения [12–14]:

$$p\varphi + \Omega_{\text{y}} K(p) F(\varphi) = \Omega_{\text{н}}, \quad (9)$$

где:

- φ – мгновенная разность фаз на выходе фазового детектора;
- Ω_{y} – полоса удержания системы ФАПЧ;
- $\Omega_{\text{н}}$ – начальная круговая расстройка;
- $K(p)$ – коэффициент передачи разомкнутой системы в операторной форме.

Для анализа данной линейной системы можно использовать хорошо разработанные методы из теории автоматического регулирования [12].

Оптимальные параметры схемы генератора КВЧ диапазона определяются по критерию минимума дисперсии частоты (фазы) колебаний выходного сигнала синхронизируемого генератора с учетом характерных особенностей спектров всех элементов схемы [10, 12, 13]:

$$\sigma_{\varphi_0}^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_{\varphi_0}(\Omega) \frac{1}{1 + (0,5\Omega\tau)^2} d\Omega, \quad (10)$$

где:

- $S_{\varphi_0}(\Omega)$ – энергетический спектр изменения частоты выхода стабилизируемого генератора;
- τ – интервал времени измерения;
- $\sigma_{\varphi_0}^2$ – дисперсия отклонений частоты стабилизируемого генератора.

С целью определения спектральной мощности (СПМ) $S_{\varphi_0}(\Omega)$ рассмотрим фильтрующее действие ФАПЧ на спектр выходного колебания, полагая, что в качестве фильтра низких частот используем пропорционально-интегрирующий фильтр с функцией передачи [13].

$$K(p) = \frac{(1 + pT_2)(1 + pT_3)}{(1 + pT_1)(1 + pT_4)}, \quad (11)$$

где:

- T_1, T_2, T_3, T_4 – постоянные времени фильтра.

Схема пропорционально-интегрирующего фильтра приведена на рис. 3.

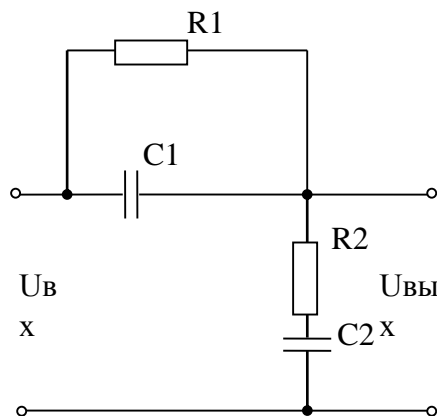


Рис. 3. Схема пропорционально-интегрирующего фильтра

В данной схеме $T_1 = R_1C_1 + (R_1 + R_2)C_2$, $T_2 = R_2C_2$, $T_3 = R_1C_1$, $T_4 = \frac{R_1C_1R_2}{R_1 + R_2}$,
 $T_1 > T_2 > T_3 > T_4$, $C_2 > C_1$ и $R_1 > R_2$.

$S_{\varphi_0}(\Omega)$ может быть представлено выражением [8]:

$$S_{\varphi_0}(\Omega) = S_{\varphi_{сг}}(\Omega) \left| \frac{1}{1 + W_p(j\Omega)} \right|^2 + S_{\varphi_{спч}}(\Omega) \left| \frac{W(j\Omega)}{1 + W_p(j\Omega)} \right|^2, \quad (12)$$

где:

- $S_{\varphi_{сг}}(\Omega)$ – энергетический спектр синхронизируемого генератора;

- $S_{\phi СПЧ}(\Omega)$ – энергетический спектр всех источников флуктуаций, считая, что они некоррелированы между собой;
- $W_p(j\Omega)$ – передаточная функция разомкнутой системы ФАПЧ.

С целью упрощения математических выкладок пренебрежением запаздыванием в трактах умножителя и УПЧ, и будем считать коэффициенты передачи всех звеньев, кроме УПЧ, ФД и ФНЧ, независимыми от частоты в полосе пропускания системы. Кроме того, пренебрежем влиянием ветви синтезатора на передаточную функцию системы и ограничимся учетом собственных шумов синхронизируемого генератора и высокостабильного генератора (ВГ).

Из рассмотрения структурной схемы (рис. 2) следует, что передаточная функция разомкнутой системы будет определяться выражением [8, 9]:

$$W_{\delta}(j\Omega) = \frac{\Omega_{\delta\ddot{A}} [1 + (j\Omega)T_2] [1 + (j\Omega)T_3]}{\{ [1 + (j\Omega)\partial_{\delta}] [1 + (j\Omega)\partial_{\delta\ddot{A}}] [1 + (j\Omega)T_1] [1 + (j\Omega)T_4] \} j\Omega} =$$

$$= \Omega_{\delta\ddot{A}} [1 + (j\Omega)T_2] [1 + (j\Omega)T_3] \{ [1 + j\Omega(\partial_{\delta} + \partial_{\delta\ddot{A}} + \partial_1 + \partial_4) +$$

$$+ (j\Omega)^2(\partial_1\partial_{\delta} + \partial_{\delta}\partial_{\delta\ddot{A}} + \partial_{\delta\ddot{A}}\partial_1 + \partial_{\delta}\partial_4 + \partial_{\delta}\partial_4 + \partial_1\partial_4) +$$

$$+ (j\Omega)^3(\partial_{\delta}\partial_{\delta\ddot{A}}\partial_1 + \partial_1\partial_{\delta}\partial_4 + \partial_{\delta}\partial_{\delta\ddot{A}}\partial_4 + T_{\delta\ddot{A}}\partial_1\partial_4) + (j\Omega)^4(\partial_{\delta}\partial_{\delta\ddot{A}}\partial_1\partial_4)] j\Omega \}^{-1}, \quad (13)$$

где:

- $\Omega_{уд} = K_y \cdot K_{\phi\delta} \cdot K_{МПТ} \cdot K_{СГ} \cdot S_y$ – полоса удержания системы ФАПЧ.

Тогда, в соответствии с (12), энергетический спектр синхронизируемого генератора будет иметь вид:

$$S_{\phi_0}(\Omega) = S_{\phi СГ}(\Omega) \left| \left\{ [1 + j\Omega(T_y + T_{\phi\delta} + T_1 + T_4) + \right. \right.$$

$$+ (j\Omega)^2(T_1T_y + T_yT_{\phi\delta} + T_{\phi\delta}T_1 + T_yT_4 + T_{\phi\delta}T_4 + T_1T_4) +$$

$$+ (j\Omega)^3(T_yT_{\phi\delta}T_1 + T_1T_yT_4 + T_yT_{\phi\delta}T_4 + T_{\phi\delta}T_1T_4) + (j\Omega)^4(T_yT_{\phi\delta}T_1T_4) \left. \right\} j\Omega \left. \right|^2 \times$$

$$\left| \left\{ [1 + j\Omega(T_y + T_{\phi\delta} + T_1 + T_4) + (j\Omega)^2(T_1T_y + T_yT_{\phi\delta} + T_{\phi\delta}T_1 + T_yT_4 + T_{\phi\delta}T_4 + T_1T_4) + \right. \right.$$

$$+ (j\Omega)^3(T_yT_{\phi\delta}T_1 + T_1T_yT_4 + T_yT_{\phi\delta}T_4 + T_{\phi\delta}T_1T_4) + (j\Omega)^4(T_yT_{\phi\delta}T_1T_4) \left. \right\} j\Omega +$$

$$\Omega_{уд} [1 + (j\Omega)T_2] [1 + (j\Omega)T_3] \left. \right|^{-2} + \quad (14)$$

$$S_{\phi ВГ}(\Omega) \left\{ \left| \Omega_{уд} (1 + j\Omega T_2)(1 + j\Omega T_3) \right|^2 \times \left| [1 + j\Omega(T_y + T_{\phi\delta} + T_1 + T_4) + \right. \right.$$

$$(j\Omega)^2(T_1T_y + T_yT_{\phi\delta} + T_{\phi\delta}T_1 + T_yT_4 + T_{\phi\delta}T_4 + T_1T_4) +$$

$$+ (j\Omega)^3(T_yT_{\phi\delta}T_1 + T_1T_yT_4 + T_yT_{\phi\delta}T_4 + T_{\phi\delta}T_1T_4) + (j\Omega)^4(T_yT_{\phi\delta}T_1T_4) \left. \right\} j\Omega +$$

$$\Omega_{уд} [1 + j\Omega T_2] [1 + j\Omega T_3] \left. \right|^{-2} \left. \right\}$$

Согласно [8,9,11] СПМ флуктуаций высокостабильного генератора (ВГ) состоит из кварцевого генератора и маломушьящего умножителя частоты.

Кварцевый генератор состоит из возбуждителя, в котором в качестве селективного элемента используется кварцевый резонатор, и буферного усилителя, предназначенного для развязки и усиления выходного сигнала кварцевого генератора. В кварцевом генераторе частота зависит от уровня мощности, рассеиваемой на кварцевом резонаторе, причем изменения частоты растут при увеличении этой мощности. Поэтому генератор выдаёт сигнал малой мощности (десятки мкВт), который затем усиливается с помощью буферного усилителя. СПМ флуктуаций высокостабильного генератора (ВГ) может быть приближенно описана следующим выражением [8, 9]:

$$S_{\varphi_{ВГ}}(\Omega) = \left(\frac{A_1}{\Omega} + A_2 \Omega^2 \right) N^2, \quad (15)$$

где:

- A_1 – коэффициент, характеризующий действие фликкер-шумов, он равен 10-10 Гц²;
- A_2 – коэффициент, характеризующий действие аддитивного шума и равный 10-13 Гц⁻¹.

Спектральная плотность флуктуаций фазы синхронизированного генератора приближенно может быть описана следующим выражением [8]:

$$S_{\varphi_{СГ}}(\Omega) = \frac{\alpha_{СГ}}{\Omega^{\alpha+2}}, \quad (16)$$

где:

- $\alpha_{СГ}$ – коэффициент, характеризующий уровень шума синхронизируемого генератора, зависящий от режима работы активных элементов генератора и нагруженной добротности колебательной системы;
- α – коэффициент, учитывающий частотную зависимость шума.

С целью упрощения дисперсии полагаем $\alpha \approx 2$. Тогда, выражение для спектральной плотности фазовых флуктуаций синхронизируемого генератора может быть записано в виде:

$$S_{\varphi_{СГ}}(\Omega) = \frac{\alpha_{СГ}}{\Omega^4}, \quad (17)$$

А спектральная плотность частотных флуктуаций будет иметь следующее выражение [8]:

$$S_{\varphi_{СГ}}(\Omega) = \frac{\alpha_{СГ}}{\Omega^2}, \quad (18)$$

где:

- $\alpha_{СГ} = 10^{-4}$ Гц³.

Для оценки возможной минимальной дисперсии фазы (частоты) однокольцевой системы ФАПЧ определим максимальное и минимальное возможное значение полосы удержания.

Максимально возможное значение полосы удержания будет определяться значением постоянной времени усилителя промежуточной частоты T_y из условия устойчивости системы:

$$\Omega_{уд} < \frac{1}{2\pi T_y}, \quad (19)$$

Постоянную времени усилителя промежуточной частоты T_y можно определить из выражения [9]:

$$T_y = n \cdot \frac{\alpha_\Delta}{\pi} \cdot \frac{1}{\Delta f}, \quad (20)$$

Где

- n – число каскадов;
- α_Δ – функция, зависящая от типа каскадов усилителя;
- Δf – полоса пропускания усилителя. Обычно $n \geq 3$, $\alpha_\Delta = 1 \dots 2$.

Полагая $\Delta f = 1$ МГц, величина T_y будет равна:

$$T_y = 3 \cdot \frac{1}{3,14} \cdot \frac{1}{10^6} \approx 10^{-6} \text{ с,}$$

$\Omega_{уд}$ будет меньше $0,1 \cdot 10^6$ рад. Минимально допустимое значение $\Omega_{уд}$ будет определяться полосой схватывания (F_{CX}) ФАПЧ:

$$\Omega_{уд} > 2\pi F_{CX}, \quad (21)$$

где $F_{CX} \geq (\delta_{KG} + \delta_{CG}) \cdot N \cdot f_{KG}$.

Положим $f_{KG} = 50$ МГц, $N = \frac{f_{\max}}{f_{KG}} = \frac{76,5}{0,05} \approx 1530$; $\delta_{KG} \approx 10^{-10}$; $\delta_{CG} = 10^{-8}$ при $\tau_u = 100$ с. При таких данных $F_{CX} \geq 7,65 \cdot 10^2$ Гц, а $\Omega_{уд} > 48,04 \cdot 10^2$ рад. Следовательно, $\Omega_{уд}$ лежит в пределах:

$$5 \cdot 10^3 \text{ рад} < \Omega_{уд} < 0,1 \cdot 10^6 \text{ рад} \quad (22)$$

Анализ систем с ФАПЧ показывает, что чем меньше полоса удержания, тем больше запас устойчивости системы [8].

Подставляя (15) и (18) в (14), получим энергетический спектр на выходе синхронизируемого генератора в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 S_{\varphi_0}(\Omega) = & \frac{\alpha_{CG}}{\Omega^2} \left| \left\{ \left[1 + j\Omega(T_y + T_{\phi D} + T_1 + T_4) + \right. \right. \right. \\
 & + (j\Omega)^2(T_1 T_y + T_y T_{\phi D} + T_{\phi D} T_1 + T_y T_4 + T_{\phi D} T_4 + T_1 T_4) + \\
 & + (j\Omega)^3(T_y T_{\phi D} T_1 + T_1 T_y T_4 + T_y T_{\phi D} T_4 + T_{\phi D} T_1 T_4 + (j\Omega)^4(T_y T_{\phi D} T_1 T_4) \left. \right] j\Omega \left. \right\} \left. \right|^2 \times \\
 & \left| \left\{ \left[1 + j\Omega(T_y + T_{\phi D} + T_1 + T_4) + (j\Omega)^2(T_1 T_y + T_y T_{\phi D} + T_{\phi D} T_1 + T_y T_4 + T_{\phi D} T_4 + T_1 T_4) + \right. \right. \right. \\
 & + (j\Omega)^3(T_y T_{\phi D} T_1 + T_1 T_y T_4 + T_y T_{\phi D} T_4 + T_{\phi D} T_1 T_4) + (j\Omega)^4(T_y T_{\phi D} T_1 T_4) \left. \right] j\Omega + \\
 & \Omega_{yD} \left[1 + (j\Omega)T_2 \right] \left[1 + (j\Omega)T_3 \right] \left. \right|^{-2} + \\
 & \left(\frac{A_1}{\Omega} + A_2 \Omega^2 \right) N^2 \left\{ \left| \Omega_{yD} (1 + j\Omega T_2)(1 + j\Omega T_3) \right|^2 \times \left| \left[1 + j\Omega(T_y + T_{\phi D} + T_1 + T_4) + \right. \right. \right. \\
 & + (j\Omega)^2(T_1 T_y + T_y T_{\phi D} + T_{\phi D} T_1 + T_y T_4 + T_{\phi D} T_4 + T_1 T_4) + \\
 & + (j\Omega)^3(T_y T_{\phi D} T_1 + T_1 T_y T_4 + T_y T_{\phi D} T_4 + T_{\phi D} T_1 T_4) + (j\Omega)^4(T_y T_{\phi D} T_1 T_4) \left. \right] j\Omega + \\
 & \left. \left. \left. \Omega_{yD} (1 + j\Omega T_2)(1 + j\Omega T_3) \right|^{-2} \right\}.
 \end{aligned} \tag{23}$$

Для определения оптимальных параметров пропорционально-интегрирующего фильтра используем частотные показатели, которые определяются по квадрату модуля коэффициента передачи замкнутой системы [8, 9]:

$$|W_3|^2 = \left| \frac{W_p(j\Omega)}{1 + W_p(j\Omega)} \right|^2, \tag{24}$$

где:

– $W_p(j\Omega)$ – коэффициент передачи разомкнутой системы.

Квадрат модуля замкнутой системы ФАПЧ (рис.2) будет определяться выражением:

$$\begin{aligned}
 |W_3(j\Omega)|^2 = & \left| \Omega_{yD} (1 + j\Omega T_2)(1 + j\Omega T_3) \right|^2 \times \left| \left[1 + j\Omega(T_y + T_{\phi D} + T_1 + T_4) + \right. \right. \\
 & + (j\Omega)^2(T_1 T_y + T_y T_{\phi D} + T_{\phi D} T_1 + T_y T_4 + T_{\phi D} T_4 + T_1 T_4) + \\
 & + (j\Omega)^3(T_y T_{\phi D} T_1 + T_1 T_y T_4 + T_y T_{\phi D} T_4 + T_{\phi D} T_1 T_4) + (j\Omega)^4(T_y T_{\phi D} T_1 T_4) \left. \right] j\Omega + \\
 & \left. \left. \left. \Omega_{yD} (1 + j\Omega T_2)(1 + j\Omega T_3) \right|^{-2}.
 \end{aligned} \tag{25}$$

Зависимость квадрата модуля замкнутой системы от частоты при различных параметрах пропорционально-интегрирующего фильтра приведена на рис. 4.

При выборе постоянной фильтра T_2 надо стремиться к тому, чтобы выполнялось

соотношение $T_1 > \frac{1}{\Delta\Omega_{\text{ФАПЧ}}}$, где $\Delta\Omega_{\text{ФАПЧ}}$ – полоса пропускания системы. В этом случае не происходит ухудшения устойчивости системы при необходимой полосе пропускания $\Delta\Omega_{\text{ФАПЧ}} \geq \Omega_{yD}$.

Из рис. 4 следует, что оптимальными параметрами пропорционально-интегрирующего фильтра будут $T_1 = 10^{-2}$ с, $T_2 = 10^{-3}$ с, $T_3 = 10^{-4}$ с, $T_4 = 10^{-5}$ с при полосе пропускания системы $\Delta\Omega_{\text{ФАПЧ}} = 10^4$ рад.

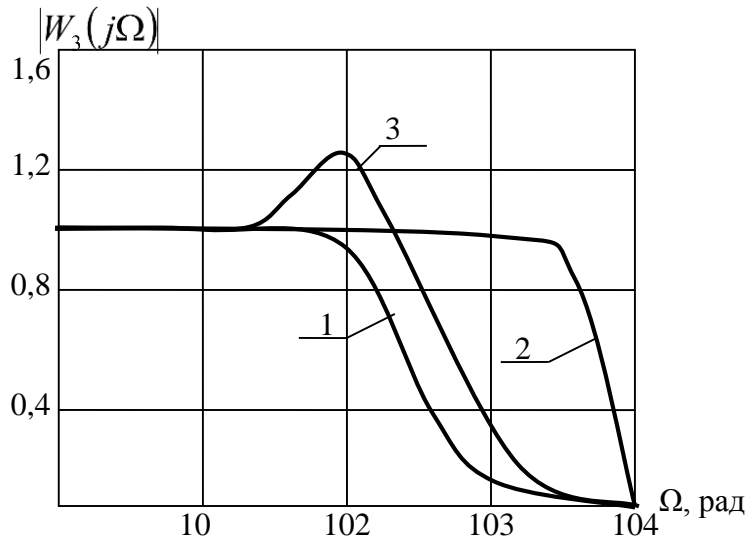


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы ФАПЧ:

- 1 – ТУ = 10-6 с; ТФД = 10-3 с; Т1 = 10-3 с; Т2 = 10-4 с; Т3 = 10-5 с; Т4 = 10-6 с; ΩУД = 104 рад;
- 2 – ТУ = 10-6 с; ТФД = 10-3 с; Т1 = 10-2 с; Т2 = 10-3 с; Т3 = 10-4 с; Т4 = 10-5 с; ΩУД = 104 рад;
- 3 – ТУ = 10-6 с; ТФД = 10-3 с; Т1 = 10-1 с; Т2 = 10-2 с; Т3 = 10-3 с; Т4 = 10-4 с; ΩУД = 104 рад;

С учетом полученных данных (ТУ = 10-6 с; ТФД = 10-3 с; Т1 = 10-2 с; Т2 = 10-3 с; Т3 = 10-4 с; Т4 = 10-5 с; ΩУД = 104 рад; N = 1530) относительная среднеквадратическая вариация частоты синхронизируемого генератора за интервал измерения τ_u будет определяться выражением [8]

$$\frac{\sigma(\langle \dot{\phi} \rangle \tau_u)_M}{\omega_{CT}} = \frac{1}{\omega_{CT}} \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S_{\dot{\phi}_0}(\Omega) \frac{1}{1 + (0,5\Omega\tau_u)^2} d\Omega}, \quad (26)$$

Анализ показывает, что интеграл в выражении (26) будет расходиться, поэтому пределы интегрирования необходимо ограничить: нижний предел – отношением $\frac{2}{T}$ (время измерения неустойчивости частоты сигнала).

Если в течении времени T делится на M за время τ_u , то T будет равно $M\tau_u$.

Принимая $M = 20$ за время 10^{-3} с, нижний предел будет равен 10^2 рад.

Верхний предел интеграла в выражении (26) будет определяться полосой пропускания системы – 10^4 рад.

Численный анализ показал, что относительная нестабильность частоты синхронизируемого генератора для однокольцевой системы ФАПЧ составляет $3,1 \cdot 10^{-3}$ с, а отношение мощности сигнала к мощности шумов D_n / D_ϕ было равно (-5 дБ).

Анализ полученных данных показывает, что однокольцевая схема ФАПЧ не может быть использована для создания стабильного по частоте генератора, перестраиваемого в диапазоне частот миллиметрового диапазона с коэффициентом умножения 1500 единиц.

Эти результаты подтверждают известные положения о том, что при коэффициенте умножения $N \geq 1 \cdot 10^4$ спектр сигнала рассыпается [9]. Поэтому следует рассмотреть систему с двумя кольцами ФАПЧ.

Выводы

1. Численный анализ показал, что относительная нестабильность частоты синхронизируемого генератора для однокольцевой системы ФАПЧ составляет $3,1 \cdot 10^{-3}$ с, а отношение мощности сигнала к мощности шумов D_n / D_ϕ было равно (-5 дБ).
2. Анализ полученных данных показывает, что однокольцевая схема ФАПЧ не может быть использована для создания стабильного по частоте генератора, перестраиваемого в диапазоне частот миллиметрового диапазона с коэффициентом умножения 1500 единиц.

Список использованных источников:

1. Федюшко Ю. М. Анализ технологии хранения фруктоплодов /Ю. М. Федюшко, // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України» – 2016. – Вип. 175. – С. 160– 162.
2. Каширская Н. Я. Болезни семечковых культур/Н. Я. Каширская. - Мичуринск, 2 006. – 164 с.
3. Мансур М. Высокостабильные СВЧ генераторы для воздействия на личинную стадию вредных насекомых в сельскохозяйственном производстве / М. Мансур, А. Д. Черенков, Е. Л. Пиротти // Вестник национального технического университета «ХПИ». – Харків: НТУ «ХПИ», 2002. – № 7. – С. 131–135
4. И. В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ. Электровакuumные приборы СВЧ / И. В. Лебедев. – М.: Высшая школа, 1972. – Т. II. – 376 с.
5. Касаткина Л. В. Полупроводниковые устройства диапазона миллиметровых волн / Л. В. Касаткина, В. Е. Чайка. – Севастополь: Вебер, 2006. – 319 с.
6. Клейман А. С. Некоторые вопросы создания и применения широкодиапазонных КВЧ источников колебаний/ А. С. Клейман, П. А. Кравченко, А. Д. Черенков, Л. Ф. Кучин // Украинский метрологический журнал. –1999. – № 2. – С. 20 –23.
7. Черенков А. Д. Анализ методов построения источников КВЧ излучения с высокой стабильностью частоты / А. Д. Черенков, Н. П. Кунденко// Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. –№ 2/8 (56). – С. 18– 22.

8. Кварцевые и квантовые меры частоты / [И. И. Акулов и др.] под ред. Б. И. Макаренко. – М.: МО СССР, 1976. – 409 с.
9. Черенков А. Д. Анализ флуктуационных характеристик двухкольцевой системы фазовой автоподстройки частоты стабилизируемого генератора/А. Д. Черенков, А. Е. Пиротти // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ». –2004. – С.82–85.
10. Каганов В. И. Системы автоматического регулирования в радиопередатчиках/ В. И. Каганов. – М.: Связь,1969. –250 с.
11. Черенков А. Д. Теоретический анализ системы преобразования частоты в генераторах миллиметрового диапазона на основе фазовой автоподстройки частоты / А. Д. Черенков, Н. Г. Косулина// Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». –2013. – Вип. 141. – С. 107–111.
12. Норенков И. П. Введение в автоматизированное проектирование технических систем и устройств/ И.П. Норенков. – М.: Высшая школа,1980. – 380 с.
13. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика: Учеб. Для вузов по спец. «Радиоавтоматика». – М.: Высшая школа,1990. – 335 с.
14. Первачев С.В. Радиоавтоматика: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1982. – 296 с.

References:

1. Fedyushko Ju. M. Analiz of tekhnologii khraneniya fruktoplodov /Yu. M. Fedyushko, // Announcer of the Kharkiv national technical university of agriculture the name P. Vasilenko «Problems of energozabezpechennya and energy-savings in APK of Ukraine» – 2016. – Vip.175. – P. 160– 162.
2. Kashirskaya N. Ya. Illnesses of pip kul'tur/N. I. Kashirskaya. – Michurinsk, 2 006. – 164 p.
3. Mansur M. High-stable SVCH generators for affecting the lichinnuyu stage of harmful insects in an agricultural production / M. Mansur, A. D. Cherenkov, Ye.L. Pirotti // Vestnik of national technical university of «KHPI». – Kharkiv: NTU «KHPI», 2002. – № 7. – P. 131–135
4. I. V. Lebedev Technique and devices SVCH. Elektrovakuumnye devices SVCH / I. V. Lebedev. – M.: Higher school, 1972. – T. II. – 376 p.
5. Kasatkina L. V. Semiconductor devices of range of millimetric waves / L. V. Kasatkina, V. E. Chayka – Sevastopol, Veber, 2006. – 319 p.
6. Kleyman A. S. Some questions of creation and application of the wide-range KVCH sources of kolebaniy/ A. S. Kleyman, P. A. Kravchenko, A. D. Cherenkov, L. F. Kuchin // Ukrainian metrology magazine. –1999. – № 2. – P. 20 –23.
7. Cherenkov A. D. Analysis of methods of construction of sources of KVCH of radiation with high stability of frequency / A. D. Handles, N. P. Kundenko// i Vostochno-evropeyskiy magazine of front-rank technologies. – 2012. –№ 2/8 (56). – P. 18– 22.
8. Quartz and quantum measures of frequency / [[I. I. Akulov and other] under red. B. I. Makarenko. – М.: МО СССР, 1976. – 409 p.
9. Cherenkov A. D. Analysis of fluctuation descriptions of the twocircular system of the phase self-tuning of frequency of the stabilized generator /A. D. Cherenkov, Ye. L. Pirotti //Vestnik of national technical university of «KHPI». – Kharkiv: NTU «KHPI». –2004. – P.82–85.
10. V. I. Kaganov. Systems of automatic control in radioperedatchikakh / V. I. Kaganov. – М.: Connection,1969. – 250 p.
11. Cherenkov A. D. Theoretical analysis of the system of transformation of frequency in the generators of millimetric range on the basis of the phase self-tuning of frequency / A. D. Cherenkov A. D., N. G. Kocelina, Ye. L. Pirotti //Vestnik of national technical university of «KHPI». – Kharkiv: NTU «KHPI», «Problemi energozabezpechennya that energozberezhennya in APK of Ukraini». –2013. Vip. 141. – P. 107–111.
12. Norenkov I.P Introduction to the automated planning of the technical systems and ustroystv/ I.P. Norenkov. – М.: Higher school,1980. – 380 p.
13. Konovalov G. F. Radioautomation: Studies. For the institutes of higher to on special. «Radioautomation». – М.: Higher school,1990. – 335 p.
14. Pervachov S. V. Radioautomation: Textbook for the institutes of higher. – М.: of Radio and connection, 1982. – 296 p.

Прийнята до друку 14.12. 2019